

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Ректор Белорусского
государственного университета

А.Д.Король

15 июля 2024 г.

Регистрационный № УД- 13650/уч.



ТЕОРИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Учебная программа учреждения образования
по учебной дисциплине для специальности:

1-31 03 02 Механика и математическое моделирование

2024 г.

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта ОСВО 7 1-31 03 02-2021 и учебного плана №G 31-1-209/уч., №G 31-1-029/уч.-СИБД от 30.06.2021.

СОСТАВИТЕЛИ:

Конон Павел Николаевич – доцент кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Василевич Юрий Владимирович – профессор кафедры теоретической механики и механики материалов машиностроительного факультета Белорусского национального технического университета, доктор физико-математических наук, профессор;

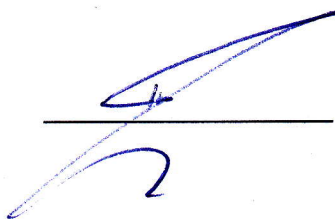
Видякин Василий Владимирович – директор Научно-производственного общества с ограниченной ответственностью «ГЕОСПЛАЙН», кандидат физико-математических наук, доцент.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой теоретической и прикладной механики
механико-математического факультета БГУ
(протокол № 13 от 25.06.2024)

Научно-методическим советом БГУ
(протокол № 9 от 28.06.2024)

Заведующий кафедрой



М.А. Журавков

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели и задачи учебной дисциплины

Целью учебной дисциплины является получение студентами качественных знаний и практических навыков решения задач в области исследования устойчивости гидродинамических течений, возникающих при изучении нестационарной динамики жидкости и газа, с возможностью их практического использования.

Задачи учебной дисциплины:

- формирование у студентов базовых знаний в области устойчивости течений жидкостей и газов;
- приобретение теоретических знаний для описания и моделирования устойчивости течений;
- обучение методам аналитического и численного исследования сформулированных задач.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Учебная дисциплина относится к модулю *дисциплинам специализации* компонента учреждения высшего образования.

Учебная программа составлена с учетом межпредметных связей и программ по дисциплинам: «Теория функции комплексного переменного», «Дифференциальные уравнения», «Уравнения математической физики», «Теоретическая механика», «Введение в механику сплошных сред», «Численные методы механики сплошных сред», «Механика жидкости и газа».

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Теория гидродинамической устойчивости» должно обеспечить формирование *специализированной компетенции*:

СК. Применять методы и законы механики к исследованию робототехнических систем и решению прикладных задач механики.

В результате освоения учебной дисциплины студент должен:

знать:

- фундаментальные понятия теории, примеры неустойчивых течений в природных явлениях и в технических приложениях,
- общую постановку задачи теории гидродинамической устойчивости,
- методы решения линейных задач гидродинамической устойчивости течений,
- методы решения нелинейных задач устойчивости течений,
- методы решения задач теории устойчивости с неизвестной областью течения;

уметь:

- формулировать физическую постановку задач устойчивости течений;
- математически сформулировать краевые задачи,
- решать и анализировать классические линейные задачи

устойчивости,

- применять полученные знания для исследования и анализа нелинейных задач устойчивости гидродинамических течений;

владеть:

- способами математического моделирования задач движения и устойчивости течений,

- аналитическими методами исследования устойчивости,

- численными и численно-аналитическими методами решения линейных и нелинейных задач устойчивости течений,

- возможностью теоретического анализа практических задач устойчивости движений жидкостей и газов.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается в 7 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Теория гидродинамической устойчивости» отведено для очной формы получения высшего образования – 90 часов, в том числе 50 аудиторных часа, из них: лекции – 8 часов, лабораторные занятия – 38 часов, управляемая самостоятельная работа (УСР) – 4 часа.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Форма промежуточной аттестации – экзамен.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел 1 Постановка задачи теории гидродинамической устойчивости

Тема 1.1 Модели течений идеальной и вязкой жидкостей

Уравнения Эйлера и Навье-Стокса. Граничные условия. Точные стационарные решения задач основных задач гидродинамики. Понятия ламинарного и турбулентного течений. Опыт Рейнольдса.

Тема 1.2 Линейная задача теории гидродинамической устойчивости

Основное течение. Метод малых колебаний. Уравнение Зоммерфельда. Задача на собственные значения. Теорема Сквайра.

Тема 1.3 Методы решения линейной задачи устойчивости

Прямой метод. Метод конечных разностей. Асимптотический метод.

Раздел 2 Невязкая неустойчивость

Тема 2.1 Неустойчивость открытых течений

Признак невязкой неустойчивости. Уравнение и теоремы Релея.

Тема 2.1. Метод Релея

Устойчивость затопленных струй, слоев смешения, следов за обтекаемыми телами.

Раздел 3 Устойчивость течений со свободной поверхностью и поверхностью раздела

Тема 3.1 Течения с поверхностью раздела двух сред

Граничные условия на поверхности раздела. Случай двух идеальных жидкостей. Случай свободной поверхности. Ветровые волны. Неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и Релея-Тейлора.

Тема 3.2 Течение с градиентом средней скорости

Исследования установившегося течения и его устойчивости под действием касательной силы.

Тема 3.3 Волны в слое жидкости на наклонной поверхности

Стационарное решение. Движение и нелинейное развитие поверхностных волн под действием силы тяжести в слое на наклонной поверхности. Метод и уравнения Капицы-Шкадова.

Раздел 4. Движение и распад капиллярных струй

Тема 4.1 Постановка задачи о движении капиллярной струи

Приближение типа пограничного слоя. Метод коллокаций. Стационарное решение.

Тема 4.2 Исследование устойчивости течения струи идеальной жидкости в линейном приближении

Исследование устойчивости в случае потенциального течения в струе. Устойчивость свободной струи. Решение Релея. Устойчивость струйного течения с учетом внешнего воздействия. Исследование устойчивости течения в струе при постоянстве давления в сечении. Связь пространственно-и временно растущих возмущений.

Тема 4.3 Нелинейное развитие возмущений в струе

Случай длинных волн. Метод Фурье исследования нелинейных решений. Развитие возмущений с учетом переменного внешнего давления. Распад струи на капли разного размера.

Раздел 5. Движение и устойчивость жидкостей, слоев и пленок в центробежном поле сил

Тема 5.1 Устойчивость течения между вращающимися цилиндрами

Стационарное решение. Устойчивость в линейной постановке. Образование вихрей Тейлора.

Тема 5.2 Относительное равновесие слоя вязкой жидкости на поверхности вращающегося цилиндра

Формы равновесия осесимметричных и плоских слоев на внутренней и внешней поверхностях вращающегося цилиндра. Первые интегралы. Ветвление решений.

Тема 5.3 Устойчивость и распад слоя вязкой жидкости на внешней и внутренней поверхностях вращающегося цилиндра

Исследование устойчивости плоского и осесимметричного слоев на внешней поверхности цилиндра в невязком приближении. Экспериментальные и теоретические исследования распада слоя на внешней и внутренней поверхностях вращающегося цилиндра. Вывод уравнения эволюции поверхности. Метод Капицы- Шкадова для течений в поле центробежных сил. Численное решение уравнений эволюции и результаты. Неизотермическая задача.

Тема 5.4 Формы равновесия, устойчивость и распад слоя вязкой жидкости на вращающемся диске

Формы равновесия осесимметричных односвязных и двусвязных капель на поверхности вращающегося диска. Их устойчивость. Экспериментальные и теоретические исследования движения изолированных и сплошных слоев по поверхности вращающегося диска. Вывод уравнения эволюции поверхности сплошного слоя. Численное решение уравнений эволюции и результаты. Возможность образования гидравлического прыжка.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Очная (дневная) форма получения высшего образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Постановка задачи теории гидродинамической устойчивости							
1.1	Модели течений идеальной и вязкой жидкостей	2			2			экспресс-опрос
1.2	Линейная задача теории гидродинамической устойчивости				2			экспресс-опрос
1.3	Методы решения линейной задачи устойчивости				2			презентация
2	Невязкая неустойчивость							
2.1	Неустойчивость открытых течений				2			экспресс-опрос
2.2	Метод Релея				2			экспресс-опрос
3	Устойчивость течений со свободной поверхностью и поверхностью раздела							
3.1	Течения с поверхностью раздела двух сред	2			2		2	отчет

3.2	Течение с градиентом средней скорости				2			экспресс-опрос
3.3	Волны в слое жидкости на наклонной поверхности				4			контрольная работа
4	Движение и распад капиллярных струй							
4.1	Постановка задачи о движении капиллярной струи				2			экспресс-опрос
4.2	Исследование устойчивости течения струи идеальной жидкости в линейном приближении	2			4			отчет
4.3	Нелинейное развитие возмущений в струе				2			экспресс-опрос
5	Движение и устойчивость жидкостей, слоев и пленок в центробежном поле сил							
5.1	Устойчивость течения между вращающимися цилиндрами				2			экспресс-опрос
5.2	Относительное равновесие слоя вязкой жидкости на поверхности вращающегося цилиндра.				4			контрольная работа
5.3	Устойчивость и распад слоя вязкой жидкости на внешней и внутренней поверхностях вращающегося цилиндра	2			2		2	отчет
5.4	Формы равновесия, устойчивость и распад слоя вязкой жидкости на вращающемся диске				4			презентация
	ВСЕГО ЧАСОВ	8			38		4	

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Основная литература

1. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: учебное пособие для студентов физических специальностей университетов : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц; под ред. Л. П. Питаевского. - Изд. 6-е, испр. - Москва : Физматлит, 2021.-Т. 6 : Гидродинамика. - 2021. - 727 с. - URL: <https://znanium.com/catalog/document?id=369178>.
2. Александров, Д. В. Прикладная гидродинамика: учебное пособие для вузов / Д. В. Александров, А. Ю. Зубарев, Л. Ю. Исакова. - Москва : Издательство Юрайт, 2024. - 109 с.
3. Швед, Г. М. Введение в динамику и энергетику атмосферы: учебное пособие / Г. М. Швед ; Санкт-Петербургский гос. ун-т. - Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2020. - 394 с. - URL: <https://znanium.com/catalog/document?id=373760>.

Дополнительная литература

1. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. II. М.: Физматгиз, 1963.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд. 5. М.: Наука, 1978.
3. Шкадов В.Я. Некоторые методы и задачи теории гидродинамической устойчивости. - Изд. МГУ, Научные труды № 25, 1973.
4. Шлихтинг. Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
5. Шкадов В.Я., Запрянов З.Д. Течения вязкой жидкости. Изд. МГУ, 1984.
6. Дразин Ф. Введение в теорию гидродинамической устойчивости. М.: Физматлит, 2005.
7. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М., Наука, 1972.
8. Бетчов Р., Криминале В. Вопросы гидродинамической устойчивости. М., Мир, 1971.
9. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир. 1986.
10. Линь Цзя-Цзяо. Теория гидродинамической устойчивости. М: ИЛ, 1958.
11. Шкадов В.Я., Конон П.Н., Епихин В.Е. О возмущенном движении слоя вязкой жидкости на поверхности вращающегося цилиндра// Инженерно-физический журнал. 1994. Т. 66, № 6.
12. Epikhin, V.E., Konon, P.N., Shkadov, V.Ya. Form of a liquid layer of constant mass on the surface of a rotating cylinder(1990) Journal of Engineering Physics, 59 (1), pp. 879-882.
13. Epikhin, V.E., Konon, P.N., Shkadov, V.Ya. Shape of an axisymmetric liquid film on the surface of a rotating cylinder (1989) Fluid Dynamics, 24 (4), pp. 507-510.

14. Konon, P.N., Zhuk, A.V. Bifurcations of Equilibrium States of a Fluid Layer Inside a Rotating Cylinder(2017) Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 90 (2), pp. 442-448

15. A. V. Zhuk, V. Y. Shkadov, Pavel N. Konon. Hydrodynamic and thermal processes of applying coating and lubrication on the inner surface of the cylinder by rotation// Interfacial Phenomena and Heat Transfer, V.9, 2021, p. 61-74.

16. Yauheni V. Audzeichyk, Pavel N. Konon Stability of a bounded liquid layer on a rotating horizontal plane// Interfacial Phenomena and Heat Transfer 11(2):11–32 (2023).

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой отметки

Диагностика результатов учебной деятельности по дисциплине «Теория гидродинамической устойчивости» проводится, как правило, во время аудиторных занятий. Для диагностики используются:

- отчеты по лабораторным работам;
- разработанные презентации;
- экспресс-опрос на аудиторных занятиях;
- контрольные работы.

Отметка за ответы на лекциях (опрос) и выполнение отчетов по лабораторным работам включает в себя полноту ответа, наличие аргументов, примеров из практики. Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины.

Формой промежуточной аттестации по дисциплине «Теория гидродинамической устойчивости» учебным планом предусмотрен экзамен.

Для студентов, пропустивших контрольные мероприятия или получивших неудовлетворительную отметку, решение о повторном проведении контрольного мероприятия выносится в соответствии с Положением о рейтинговой системе оценки знаний обучающихся по учебной дисциплине в Белорусском государственном университете.

Для формирования итоговой отметки по учебной дисциплине используется модульно-рейтинговая система оценки знаний студента, дающая возможность проследить и оценить динамику процесса достижения целей обучения. Рейтинговая система предусматривает использование весовых коэффициентов для текущей и промежуточной аттестации студентов по учебной дисциплине.

Формирование итоговой отметки в ходе проведения контрольных мероприятий текущей аттестации (примерные весовые коэффициенты, определяющие вклад текущей аттестации в отметку при прохождении промежуточной аттестации):

- разработанные презентации – 20 %;
- отчеты по лабораторным работам – 50 %;
- контрольные работы – 30%.

Итоговая отметка по дисциплине рассчитывается на основе итоговой отметки текущей аттестации (рейтинговой системы оценки знаний) – 40 % и экзаменационной отметки – 60 %.

Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы

Тема 3.1 Течения с поверхностью раздела двух сред (2ч.)

Задание. Исследовать устойчивость течений с поверхностью раздела двух неограниченных перемещающихся с различными постоянными скоростями жидкостей в невязкой постановке с учетом сил тяжести и поверхностного натяжения в двумерном случае.

а) Получить общее дисперсионное соотношение для течения двух невязких неограниченных жидкостей с поверхностью раздела. Показать, что волны на свободной поверхности всегда устойчивы. Найти фазовую скорость распространения таких волн.

б) Исследовать общее дисперсионное соотношение для течения двух невязких неограниченных жидкостей с поверхностью раздела воздух-вода. Построить график зависимости скорости нарастания неустойчивых возмущений $\alpha c_i(\alpha)$ для различных значений модуля разности постоянных скоростей основных потоков, равных 0;1;5,10 м/с.

Тема 5.3 Устойчивость и распад слоя вязкой жидкости на внешней и внутренней поверхностях вращающегося цилиндра (2ч.)

Задание. Исследовать устойчивость слоя вязкой жидкости на внешней и внутренней поверхностях вращающегося цилиндра в невязкой постановке

а) Рассмотреть осесимметричное течение слоя на вращающемся цилиндре.

б) Исследовать устойчивость плоского слоя.

Форма контроля – проверка отчета по лабораторной работе.

Примерный перечень лабораторных занятий

Лабораторная работа № 1. Исследование устойчивости затопленной струи методом Рейнольдса.

Лабораторная работа № 2. Исследование устойчивости двух встречных потоков методом Рейнольдса.

Лабораторная работа № 3. Исследование устойчивости поверхности раздела двух невязких потоков в ограниченной области течения.

Лабораторная работа № 4. Неустойчивость капиллярной струи жидкости, обтекаемой внешним потоком, в потенциальном течении.

Лабораторная работа № 5. Неустойчивость плоского слоя жидкости на вращающемся цилиндре в линейном приближении.

Лабораторная работа № 6. Неустойчивость осесимметричного слоя жидкости на вращающемся цилиндре в линейном приближении.

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

При организации образовательного процесса используется **практико-ориентированный подход**, который предполагает:

- освоение содержание образования через решения практических задач;
- приобретение навыков эффективного выполнения разных видов профессиональной деятельности;
- использование процедур, способов оценивания, фиксирующих формирование профессиональных компетенций.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы

При изучении учебной дисциплины организация самостоятельной работы студентов должна представлять единство трех взаимосвязанных форм:

- 1) внеаудиторная самостоятельная работа;
- 2) аудиторная самостоятельная работа, которая осуществляется под непосредственным руководством преподавателя;
- 3) творческая, в том числе научно-исследовательская работа.

На лекционных занятиях по дисциплине «Теория гидродинамической устойчивости» рекомендуется контролировать усвоение учебного материала студентов путем проведения экспресс-опросов по темам дисциплины. При этом необходимо фиксировать внимание на использование изученных терминов, принципов и законов для соответствующих моделей.

На лабораторных занятиях по дисциплине «Теория гидродинамической устойчивости» рекомендуется применять вариативные индивидуальные, в том числе исследовательские, задания для студентов с целью приобретения навыков самостоятельного решения практических задач.

В силу различного уровня готовности студентов к восприятию новых понятий на лабораторных занятиях по дисциплине рекомендуется проводить регулярные самостоятельные работы и при необходимости проводить дополнительные консультации для объяснения и закрепления сложного материала.

Условия для самостоятельной работы студентов, в частности, для развития навыков самоконтроля, способствующих интенсификации учебного процесса, обеспечиваются наличием и полной доступностью электронных вариантов курсов лекций, учебно-методических пособий и сборников задач по основным разделам дисциплины.

Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Основные уравнения и постановка задачи об устойчивости стационарных течений. Метод малых колебаний.
2. Уравнение Орра-Зоммерфельда. Задача на собственные значения. Теорема Сквайра.
3. Исследования устойчивости струйного течения с профилем $U=(ch y)^{-2}$.

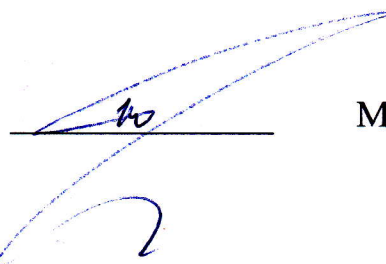
4. Неустойчивость течений в следах и струях. Невязкая неустойчивость. Уравнение Релея.
5. Метод Релея исследования невязкой неустойчивости. Примеры: устойчивость струйного течения, устойчивость встречных потоков.
6. Неустойчивость в течениях с поверхностью раздела. Неустойчивость Тейлора-Лапласа. Неустойчивость Гельмгольца.
7. Течение под действием касательного напряжения, его устойчивость.
8. Неустойчивость и распад капиллярных струй. Стационарное решение. Исследование устойчивости в линейном приближении при потенциальном течении.
9. Исследование устойчивости капиллярных струй в линейном приближении при постоянстве давления в сечении.
10. Нелинейная неустойчивость. Нелинейное развитие возмущений в струе идеальной жидкости.
11. Движение слоя на наклонной поверхности. Метод Капицы-Шкадова.
12. Устойчивость течения между вращающимися цилиндрами. Стационарное решение. Образование вихрей Тейлора.
13. Движение слоя жидкости на внешней поверхности вращающегося цилиндра. Исследование форм относительного равновесия. Первые интегралы в осесимметричном и плоском случаях. Исследование форм равновесия в естественных координатах.
14. Движение слоя жидкости на внешней поверхности вращающегося цилиндра. Ветвление квазистационарных решений в линейном приближении. Бифуркации квазистационарных решений в нелинейной задаче.
15. Исследование устойчивости плоского слоя на внешней поверхности закрученного цилиндра в невязком приближении.
16. Исследование устойчивости осесимметричного слоя на внешней поверхности закрученного цилиндра в невязком приближении
17. Экспериментальные исследования распада слоя на внешней поверхности вращающегося цилиндра.
18. Теоретические исследования распада слоя на внешней поверхности вращающегося цилиндра. Вывод уравнения эволюции поверхности. Численное решение уравнений эволюции и результаты.
19. Формы равновесия и распад слоя вязкой жидкости на вращающемся диске. Гидравлический прыжок.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Учебная дисциплина не требует согласования			

Заведующий кафедрой теоретической и
прикладной механики
доктор ф/м наук профессор

25. 06 " 202 4 г.



М.А.Журавков

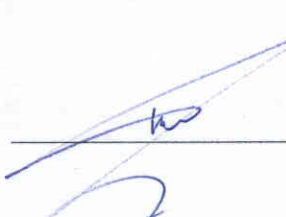
**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ ПО
ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**
на 2025/2026 учебный год

«__» _____ 202__ г.

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание
1	Учебная программа по учебной дисциплине «Теория гидродинамической устойчивости» № УД-13650 /уч. от 15.07.2024 соответствует учебному плану БГУ № G31-1-209/уч.-СИБД от 22.03.2022	Решение Научно-методического Совета БГУ (27 мая 2022, протокол №5)

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры теоретической и прикладной механики (протокол № 12 от 23.05 2025 г.)

Заведующий кафедрой
д-р физ.-мат. наук, профессор



М.А.Журавков

УТВЕРЖДАЮ
Декан механико-математического
факультета
д-р физ.-мат. наук, профессор



С.М.Босяков